



IKER  
GAZTE  
NAZIOARTEKO  
IKERKETA EUSKARAZ

## IV. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2021eko ekainaren 9, 10 eta 11a  
Gasteiz, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:  
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

### INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

Instalazio termiko baten  
modelatze energetikoa

*Arrate Hernández Arizaga,  
Ana Picallo-Pérez eta  
José María Pedro Sala-Lizarraga*

49-56 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iv.03.06>



## Instalazio termiko baten modelatze energetikoa

Hernández-Arizaga, A., Picallo-Pérez, A., Sala-Lizarraga, J.M.P.

*Euskal Herriko Unibertsitatea. ENEDI ikerketa taldea. Ingeniaritza Energetikoa Saila.  
Bilboko Ingeniaritza Eskola. Torres Quevedo Ingeniaría Plaza, 1 48013 – Bilbo.  
arrate.hernandez@ehu.eus*

### Laburpena

Eraikinen bizitza erabilgarri luzea dela eta, operazio-unea da kontsumo energetiko gehien daukan aroa. Ondorioz, operazio-portaera analizatu eta optimizatzea da energia aurrezteko erronka nagusia. Lan honetan, funtzionamenduan dagoen instalazio termiko baten energia-modeloa aurkezten da. Instalazioak, Durangoko 26 etxebizitza ur bero sanitarioaz eta berokuntzaz hornitzen ditu. Energia-modeloa definitzeko kutxa grisa eta beltza modelatze teknikak erabili dira, TRNSYS eta Matlab softwareak konbinatuz. Horretarako, gauzatu beharreko modelatze urratsak deskribatzen dira eta modeloak instalazio errealekin duen lotura zehazten da, ziurgabetasun- parametroak kalkulatu. Modeloaren ziurgabetasun maila kalkulatzeko, MBE eta  $C_v$ (RMSE) indize estatistikoak erabiltzen dira.

Hitz gakoak: Instalazio termikoa, energia-modeloa, TRNSYS, Matlab, ziurgabetasuna.

### Abstract

*Due to the long useful life of the buildings, the operation time is the period of greatest energy consumption. Consequently, the main challenge for energy savings is to analyze and optimize the mode of operation. This paper presents the energy model of a thermal facility that is in operation. The facility supplies sanitary hot water and heating to 26 homes in Durango. For the definition of the energy model, grey and black box modeling techniques have been used, combining TRNSYS and Matlab software. To do this, the modelling steps to be carried out are described and the relation of the model with the actual installation is determined, calculating the uncertainty parameters. The degree of uncertainty of the model is calculated from the statistical indices MBE and  $C_v$ (RMSE).*

*Keywords: Thermal facility, energy model, TRNSYS, Matlab, uncertainty.*

## 1. Sarrera eta motibazioa

XVIII. mendean, lehen industria iraultzarekin batera, gizakiak erregai fosilen ustiapena areagotu zuen bere energia beharrak asetzeko. XX. mendearen bukaeran, erregai fosilen erabilera oinarritutako energia modeloak mundu mailan klima aldaketa eragiten ari zela onartu zen. Klima aldaketaren eragilea, erregai fosilen errekuntzan atmosferara isurtzen diren eta berotegi efektua sortzen duten gasak dira, karbono dioxidoa besteak beste. Fenomeno honek munduarentzat ekarri ditzakeen ondorio lazgarriak arintzeko, erregai fosiletan oinarritutako energia modeloa aldatzeko ekintzak<sup>1</sup> martxan daude. Energia-modelo berriaren ildo nagusiak, jatorri berriztagarria duten energia iturrien ustiapena modu iraunkorrean egitea eta eraginkortasun energetikoa dira.

Eraikinek bere bizi-ziklo guztian energia kontsumitzen dute. Hauen batezbesteko bizitza erabilgarria 20 urtekoa izanik, operazio-unea da kontsumo gehien daukan aroa. Gaur egun, eraikinek mundu mailako energia-behar guztiaren %40-a kontsumitzen dute<sup>2</sup> eta eraikina ur bero sanitarioz eta konfort termiko baldintzez hornitzen dituzten instalazio termikoei, energia kontsumoaren %50-a leporatzen zaie (Pérez-Lombard et al., 2008) . Gizartearen erosotasun maila handitzen doan heinean, energia-eskaera igotzen da eta hau da hain zuzen ere

<sup>1</sup><https://www.miteco.gob.es/eu/cambio-climatico/temas/default.aspx>

<sup>2</sup>[www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFC\\_Share\\_BySector](http://www.iea.org/data-and-statistics/?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFC_Share_BySector)

etorkizunerako aurreikusten dena (Berardi, 2017). Hortaz, energia aurrezteko ekintzak ezinbestekoak dira. Ondorioz, instalazio termikoen operazio-portaera analizatu eta optimizatzea da eraikinetan energia aurrezteko erronka nagusia. Hala ere, analisi hauek egitea ez da bat-bateko akzioa.

## 2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Eraikinaren energia eskaria baldintzatzen duten faktoreen artean eragin handikoenak tokiko klima- baldintzak eta erabiltzaileen ohiturak dira (Jordan eta Vajen, 2001). Faktore hauek, denboran zehar finkoak ez izatera, energia eskaria aldakorra izatea eragiten dute eta ondorioz, instalazio termikoen portaera, dinamikoa izatera behartzen dute (Sala-Lizarraga eta Picallo-Perez, 2019). Hala, instalazio termiko batean edozein energia-azterketa egiteko beharrezkoa da instalazioan ematen diren masa eta energia trukeak ezagutzea. Horretarako, instalazioak etengabe monitorizatuta egon behar du. Zentzu honetan, instalazioetan sentsoreak jartzeak eta hauek mantentzeak suposatzen duen kostua dela eta, ez dira ugariak (Zhengwei eta Gongsheng, 2013).

Eraikin eta instalazioen energia-portaera dinamikoa ezagutzeko, maiz erabiliak dira energia-simulaziorako softwareekin eraikitako energia-modeloak (Coakley et al., 2014). Energia-modeloek eraikin eta instalazioetan ematen diren fenomeno fisikoak erreproduzitzen dituzte. Energia-simulaziorako softwareak fenomeno fisikoak modelatzen dituzte kutxa zuria, kutxa grisa eta kutxa beltza modelatzeko tekniken bitartez (Afroz et al., 2018). Kutxa zuriaren teknikaren bitartez eraikitako modeloak ezagunak diren lege fisikoak deskribatzen dituzten ekuazioetan oinarritzen dira. Kutxa beltzaren teknikarekin eraikitako modeloak aldiz, datu enpirikoetan. Kutxa grisaren modelatzeko teknika bien artekoa da.

Energia-modeloak eraikitzeko ohikoak diren softwareen artean (Mahmud et al., 2018), TRNSYS eta Matlab aurkitzen dira, besteak beste. Software ezberdinek ematen dituzten aukerak konbinatzen dira energia-modeloaren erantzuna hobetzeko (Picallo-Perez et al., 2020) lanean egiten den bezala. Funtzionamenduan dagoen instalazio batean oinarritutako energia-modelo bat eraikitzen bada eta energia-modelo horretatik ateratzen diren ondorioak aintzat hartzea nahi badira, beharrezkoa da energia-modeloa baliozkotzea. Hau da, energia-modeloaren kalitatea zehaztea ziurgabetasun parametroen kalkuluen bitartez. Energia-modelo baten baliozkotzea, kalibrazio prozesuen bitartez lortzen da.

Kalibrazio prozesu bat aurrera eramateko ez dago prozedura estandarizatu bat. Luze joaten den prozesua da, arlo anitzetako jakintza eskatzen duena eta datu enpiriko asko behar dituen (Hong et al., 2018). Hau dela eta, estandar baten eskakizunen arabera baliozkotuak dauden energia-modeloekin lan egitea ez da ohikoa. Adibide batzuk (Qiu et al., 2018), (Cacabelos et al., 2015), (Cacabelos et al., 2017) eta (Larochelle et al., 2019) lanetan aurkitzen diren energia-modeloak dira.

Lan honetan aurkezten den energia- modeloak, instalazio termiko baten monitorizazio sistemak, urte betez erregistratutako datuak ditu abiapuntutzat. Datuak, SCADA sistema batean biltegitratzen dira. Instalazioaren funtzionamenduaren adierazgarriak diren 8 egunetako erregistroak aukeratu dira eta egun horietan oinarritutako energia-modeloa eraiki da TRNSYS eta Matlab softwareak konbinatuz. Lan honen helburua, energia-modeloaren modelatze-prozesuaren urratsak aurkeztea da eta energia-modeloaren kalitatea zehaztea, modeloaren eta instalazio errealaen arteko energia kontsumoak konparatuz, ziurgabetasun parametrotzat, MBE eta Cv(RMSE) indize estatistikoak erabiliz. Ziurgabetasun parametrotzat MBE eta Cv(RMSE) indize estatistikoaren erabilera, beste elkarte aipagarriren artean, ASHRAE elkarteak proposatzen ditu (ASHRAE, 2002). Halaber, modelo baliozkotzeko indize estatistiko mugak zeintzuk diren finkatzen ditu.

### 3. Ikerketaren muina

Atal honetan, lehendabizi, instalazio termikoaren deskribapena egiten da. Ondoren, modelatze-prozesua nola gauzatu den azaltzen da eta azkenik, energia-modeloaren kalitatea zehazten duten ziurgabetasun-parametroen kalkuluak emandako emaitzak adierazten dira.

#### 3.1. Instalazioaren deskribapena

Eraikin batean dagoen instalazio termiko baten helburua, eraikina ur bero sanitarioarekin (UBS) eta konfort termiko baldintzekin hornitzea da. Instalazioa, funtzio ezberdinak dituzten elementuz osatutako multzoa da. Elementuak tutuen bitartez lotzen dira. Tutuak, fluxu bero-eramaileak zeharkatzen dituzte. Ohikoena da, fluxuak osatzen duten sustantzia ura izatea. Hortaz, ur fluxuek beroa eramaten dute instalazio termikoa osatzen duten elementuak zeharkatuz, sortze puntutik, kontsumo punturaino.

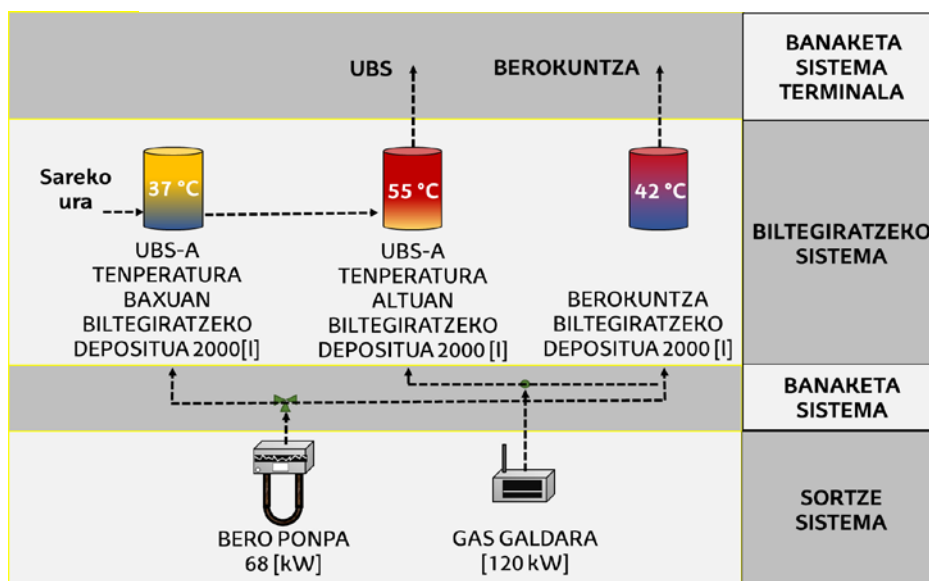
##### 1.irudia: Instalazio termikoa kokatzen den eraikina.



Ikerketaren muina osatzen duen instalazioak, Durangoko 26 etxebizitza UBS eta berokuntzaz hornitzen ditu. 1. irudiak instalazio termikoa kokatzen den eraikina erakusten du.

Zentralizatua den instalazioak eraikin guztia hornitzen du. Energia sorkuntza sistema hibridoa da eta energia metaketarako gaitasuna dauka. Energia sorkuntza sistema 68 kW-ko potentzia izendatuko bero-ponpa geotermiko batez eta 120 kW-ko potentzia izendatuko gas naturala erretzen duen kondentsazio-galdara batez osatua dago. 2000 l-dun 3 depositu dauzka energia metaketarako. 2 UBS-a biltegitratzeko eta 1 berokuntzarako. 2. irudiak instalazioaren eskema sinplifikatua erakusten du eta ura biltegitratzen den deposituetan agindu tenperaturak adierazten dira.

**2. irudia: Instalazio termikoaren eskema sinplifikatua.**



Kontrol eta erregulazio sistemak instalazioaren funtzionamendu zuzena ahalbidetzen du eta berokuntzaren ekoizpena urriaren 15-etik maiatzaren 14-ra mugatzen du.

Instalazioa monitorizatuta dago eta sentsoreek egindako erregistroak SCADA sistema baten bidez biltegitzen dira. Instalazioak dituen sentsoreak, 26 termopare, zirkuitu primarioetan dauden 4 energia kontagailu eta terminaletan UBS eta berokuntza kontsumoa neurtzen duten kontagailuak dira.

**3.2. Modelatze-prozesua**

Modelatze-prozesuan hiru urrats bereizten dira. Lehenengo urratsaren helburua, oinarriko energia-modelo bat eraikitzea da. Bigarren eta hirugarren urratsak, energia-modeloaren energia kontsumoa optimizatzean datza.

Modelatze-prozesuaren lehenengo eta bigarren urratsak TRNSYS softwarearekin eman dira. TRNSYS kutxa gris modelatze teknikan oinarritzen da energia-modeloa sortzeko. TRNSYS-eko liburutegitik hartu dira energia-modeloa osatzen duten elementuak, type deritzenak. Type bakoitza kutxa gris bat da. Honela, type bakoitzak betetzen dituen masa eta energia kontserbapenerako ekuazioak definituta daude eta sarrerako datuak, input-ak, behar dituzten ekuazioak bete eta erantzuna, output-a emateko. Type baten input-ak erabiltzaileak definitzen ditu edo beste type baten output-a dira. Modelatzearen hirugarren urratsa, Matlab-en System Identification Tool tresnarekin gauzatu da. Tresna honek, kutxa beltzaren modelatze teknika erabiltzen du ekuazioak sortzeko. Input eta output-ek baliatzen da beraien arteko lotura ezartzeko ekuazio bat sortuz. Exogenous autoregressive (ARX) egituraren oinarritutako bi ekuazio sortu dira tresna honen bitartez eta TRNSYS-en eraikitako energia-modeloan sartu da.

Modelatze-prozesuaren lehenengo urratsaren helburua TRNSYS 1 modelo eraikitzea da. Horretarako type-n aukeraketa, dagokien parametroen definizioa, antolaketa espaziala eta energia-modeloaren kontrola ezarri dira. Pausu hau gauzatzeko, instalazioa osatzen duten elementuen dokumentazio teknikoa, instalazioaren funtzionamendu-printzipioaren eskema eta exekuzio proiektua erabili dira. Lehenengo urratsa osatzeko, energia-modeloaren eskaria zehaztu da. Horretarako, SCADA-n biltegitutako eta instalazioaren funtzionamenduaren adierazgarritzat hartu diren 8 egunetako energia-kontsumo erregistroak aukeratu dira energia-

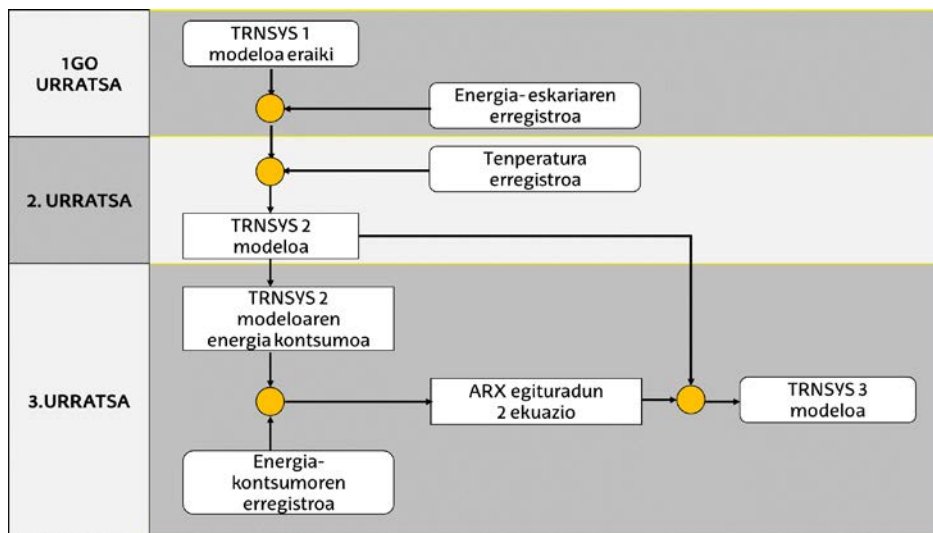
modeloaren eskariaren balio bezala. Eskariaren banaketa eta Durangoko sareko uraren temperatura (Iturriaga-Hidalgo, 2017) tesian sortutako tresnarekin lortu dira.

Bigarren urratsean, SCADA-n biltegitratutako eta instalazioaren funtzionamenduaren adierazgarritzat hartu diren 8 egunetako, instalazioaren kontrolarekin lotura duten temperatura balioak hartu dira. Hauek, oinarritzko TRNSYS 1 modeloan input bezala sartu dira energia-modeloaren eta instalazioaren martxa eta geldialdi denbora tarteak parekatzeko. Modelo hau TRNSYS 2 modelo da.

Hirugarren urratsean TRNSYS 2 modeloak ematen duen energia kontsumoa eta SCADA-n biltegitratutako eta instalazioaren funtzionamenduaren adierazgarritzat hartu diren 8 egunetako energia kontsumoa erlazionatzen dituzten 2 ekuazio energia-modeloan ordezkatu dira, TRNSYS 3 modelo lortuz.

3. irudiak modelatze-prozesuaren fluxu diagrama erakusten du.

### 3. irudia: Modelatze-prozesuaren fluxu diagrama.



### 3.3. Emaitzak

Energia-modeloaren kalitatea zehazten da hurrengo ziurgabetasun parametroak kalkulatu:

- Batez besteko alborapen-errorea, (mean bias error, MBE).
- Batez besteko balio koadratikoaren aldakuntza-koefizientea (coefficient of variation of the root mean square error, Cv(RSME)).

$$MBE = \frac{\sum_{Denboraldi} (S - M)_{Tarte}}{\sum_{Denboraldi} M_{Tarte}} \times 100 \quad (1)$$

$$C_v(RMSE_{Denboraldi}) = \frac{RMSE_{Denboraldi}}{A_{Denboraldi}} \times 100 \quad (2)$$

$$RMSE_{Denboraldi} = \sqrt{\frac{\sum (S - M)_{Tarte}^2}{N_{Tarte}}} \quad (3)$$

$$A_{Denboraldi} = \frac{\sum_{Denboraldi} M_{Tarte}}{N_{Tarte}} \quad (4)$$

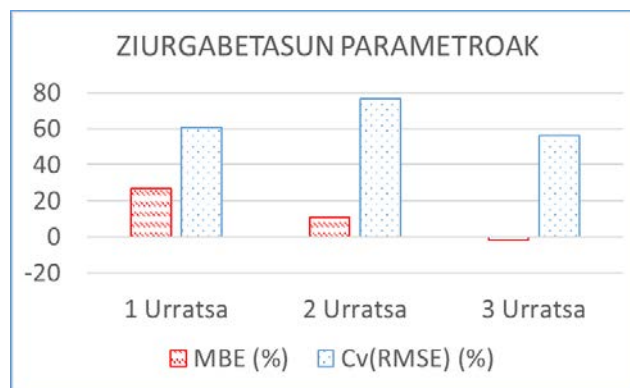
Formuletako ikurrak hauek dira:

- S: energia-modeloaren energia-kontsumoa.
- M: funtzionamenduan dagoen instalazioaren energia-kontsumoa.
- N: denboraldi batean dagoen tarte-kopurua.

Simulazioa instalazioaren funtzionamenduaren adierazgarritzat hartu diren 8 egunetako egin da beraz, 192 ordu simulatu dira. Formuletan, orduero neurtutako energia kontsumoak ordezkatu dira.

Modelatze-prozesuaren urrats bakoitzean ziurgabetasun parametroak kalkulatu dira. Urrats bakoitzean lortutako ziurgabetasun-parametroen emaitzak hurrengo grafikoan erakusten dira:

### 3. irudia: Modelatze urratsetan kalkulaturako ziurgabetasun parametroak.



Emaitzen arabera, modelizazio prozesuan emandako urratsak energia-modeloaren kalitatea hobetzen dute, MBE eta  $C_v$ (RMSE) indize estatistikoaren bitartez kalkulatu den energia-modeloaren ziurgabetasun portzentaia murriztu delako. Lan honetan erakusten den bezalako energia-modelo bat baliozkotuta egon dadin eskatzen zaizkion MBE eta  $C_v$ (RMSE) indizeen balioak,  $\pm$  %10 tartekoak eta %30- etik beherakoak dira hurrenez-hurren ASHRAE elkarteak proposatutakoaren arabera.

## 4. Ondorioak

Asko dira energia-modeloan neurtzen den ziurgabetasunaren arrazoiak eta jatorria, energia-modeloaren modelatze prozesuan erabiltzen den softwarean aurkitu daiteke, bai instalazio errealean. Ziurgabetasuna murrizteko eta energia-modeloa hobetzeko ezinbestekoa da instalazioaren inguruko informazio zehatza edukitzea.

Lan hau egitearen esperientziatik ateratzen den ondorio garrantzitsu bat da beharrezkoa dela instalazioetan dauden sensore kopurua handitzea eta sensoreek jasotzen duten informazioaren bitartez instalazioen portaera dinamiko deskribatzea.

## 5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lan honek etorkizuneko ikerketetarako bidea irekitzen du. Helburua, eraikinetako instalazio termikoen eraginkortasun energetikoa hobetzearena da.

Horretarako, ekintzetako bat termoeconomia aplikatzea da sistema osoan kostuen banaketaren azterketa zehatza egiteko. Termoekonomiak, termodinamikaren bigarren printzipioaren eta aldagai ekonomikoen bidez, energia kontsumoan eragin handiena duten puntuak zentzuz behatu eta kuantifikatzeko aukera ematen du. Aparteko kontsumo horiek gastu saihegarri edo saihestezinetan sailkatu daitezke, energiaren, ekonomiaren eta ingurumenaren ikuspuntutik.

Honetaz gain, termoekonomiak ekipoen barne-konexio termodinamikoak direla eta ematen diren efektuak erlazionatzen ditu eta ekipo bakoitzak gainerakoetan zein eragin duen detektatzeko aukera ematen du. Hau funtsezkoa izanik akatsak aztertu eta kontrolatzeko.

## 6. Erreferentziak

- Afroz, Z., Shafiullah, G. M., Urmee, T., & Higgins, G. (2018). Modeling techniques used in building HVAC control systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 83, 64–84.
- ASHRAE. (2002). *ASHRAE Guideline 14–2002, Measurement of Energy and Demand Savings*.
- Berardi. (2017). A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 230–241.
- Cacabelos, Eguía, Febrero, & Granada. (2017). Development of a new multi-stage building energy model calibration methodology and validation in a public library. *Energy and Buildings*, 146, 182–199.
- Cacabelos, Eguía, Míguez, Granada, E., & Arce. (2015). Calibrated simulation of a public library HVAC system with a ground-source heat pump and a radiant floor using TRNSYS and GenOpt. *Energy and Buildings*, 108, 114–126.
- Coakley, Raftery, & Keane. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 123–141.
- Hong, Langevin, & Sun. (2018). Building simulation: Ten challenges. *Building Simulation*, 11(5), 871–898.
- Iturriaga-Hidalgo,. (2017). *Desarrollo de un método simple para la optimización del diseño de las instalaciones en edificios residenciales de consumo energético casi nulo en el País Vasco.(In Spanish)*. UPV-EHU.
- Jordan, & Vajen. (2001). Influence of the DHW load profile on the fractional energy savings: A case study of solar combi-system with TRNSYS simulations. *Solar Energy*, 69, 197–208.
- Larochelle Martin, Monfet, Nouanegue, Lavigne, & Sansregret. (2019). Energy calibration of HVAC sub-system model using sensitivity analysis and meta-heuristic optimization. *Energy and Buildings*, 202.



- Mahmud, Amin, Hossain, & Ravishankar. (2018). Computational tools for design, analysis, and management of residential energy systems. *Applied Energy*, 221, 535–556.
- Pérez-Lombard, Ortiz, & Pout. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398.
- Picallo-Perez, Sala-Lizarraga, Tsatsaronis, & Sayadi. (2020). Advanced exergy analysis in the dynamic framework for assessing building thermal systems. *Entropy*, 22(1), 32.
- Qiu, Li, Pang, Zhang, & Li. (2018). A quick auto-calibration approach based on normative energy models. *Energy and Buildings*, 172, 35–46. Scopus.
- Sala-Lizarraga, & Picallo-Perez,. (2019). *Exergy Analysis and Thermoconomics of Buildings: Design and Analysis for Sustainable Energy Systems*. Butterworth-Heinemann.
- Zhengwei, & Gongsheng. (2013). Preventive approach to determine sensor importance and maintenance requirements. *Automation in Construction*, 31, 307–312.

## **7. Eskerrak eta oharrak**

Egileek eskertzen dute Eusko Jaurlaritzaren Eraikuntza Kalitatearen Kontrolerako Laborategiak emandako laguntza.